ویژگی‌های تورمی و تحکیمی خاک‌رس مسلح شده با خرده لاستیک *

محرم اسدزاده[۱] حسین سلطانی جیقه[۲]

چکیده: *تولید و انباشت روز افزون لاستیک‌های فرسوده در دهه‌های اخیر سبب بروز خطرها و مشکل‌های زیست محیطی و بهداشتی در سراسر جهان شده است. برای مدیریت این مواد، به تازگی امکان استفاده از این مصالح را در پروژه‌های عمرانی به صورت مخلوط خاک – خرده لاستیک مطرح کرده اند. در گذشته مطالعه هایی بر روی مخلوط‌های رس- خرده لاستیک انجام شده ولی رفتار تورمی، ویژگی‌های تحکیمی و نشست- پذیری خاک‌های رسی مخلوط با خرده لاستیک به خوبی معلوم نمی‌باشد. برای این منظور، چندین نمونه از مخلوط‌های رس- خرده لاستیک حاوی مقدارهای وزنی ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ خرده لاستیک تهیه شده و بر روی آن‌ها آزمایش‌های تراکم و تحکیم ادئومتری انجام می‌شود. نتیجه ها نشان می‌دهند که در اثر افزودن خرده لاستیک توانایی تورمی خاک‌های رسی کاهش می‌یابد به‌طوری‌که مقدارهای تورم آزاد و فشار تورمی نمونه-های مخلوط دارای ۳۰٪ خرده لاستیک باتقریب ناچیز است. نتیجه‌هابیان‌گر آن است که اندازه خرده لاستیک بر تورم آزاد و فشار تورمی نمونه‌های مسلح شده با خرده لاستیک اثر می‌گذارد. همچنین نتیجه‌های آزمایش‌های تحکیم نشان می‌دهند که شاخص تحکیم نمونه‌های مخلوط با افزایش درصد خرده لاستیک کاهش واز سوی دیگر، شاخص تورم آن‌ها افزایش می‌یابد. افزون بر این، رفتار نشست‌پذیری نمونه‌ها به اندازه خرده لاستیک و درصد خرده لاستیک بستگی دارد.*

واژه‌های کلیدی: مخلوط رس- خرده لاستیک، تحکیم، تورم آزاد، فشار تورم، نشست.

Swelling and Consolidation Properties of Clayey Soils Reinforced with Tire-Chips

M. Asadzadeh H. Soltani Jigheh

Abstract *Excessive production and stockpile of scrap tires cause some environmental and sanitary risks throughout the world. To manage these materials, possible use of soil-tire mixtures has been recently propounded in civil engineering projects. A few studies previously have been conducted to evaluate behavior of clay-tire mixtures, while swelling properties, consolidation and settlement characteristics of this type of mixtures are not known admirably. For this purpose, a number of clay-tire chips mixtures were prepared (by adding 10%, 20%, and 30% tire-chips to the clay), and compaction and oedometric consolidation tests are carried out on them. The results show that adding tire-chips to the clay, reduces swelling potential of the mixtures, while the free swelling and swelling pressure of specimen consist of 30% tire-chips is negligible. Also, size of the tire-chips may affect the values of free swelling and swelling pressure. In addition, the results of oedometric consolidation tests indicate that when the tire content increases, compression and swelling indices of the specimens decrease and increase, respectively. Moreover, the settlement behavior of the specimens depends on the tire-chips content and size of the chips.*

Key Words Clay-Tire Chips mixture, Consolidation, Free Swelling, Swelling pressure, Settlement.

---

* نسخه‌ی اول مقاله در تاریخ ۱۳۸۹/۱۰/۱۵ و نسخه‌ی نهایی آن در تاریخ ۱۳۹۰/۱۰/۲۵به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده ی مسئول، دانشجوی کارشناس ارشد مکانیک خاک و پی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان

(۲) استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تربیت معلم آذربایجان

مقدمه

Chen در سال ۱۹۸۸ و Nelson و Miller در سال ۱۹۹۲بررسی کردند که خاک‌های ریزدانه چسبنده با خمیری بالا در اثر جذب آب متورم شده و به علت از دست دادن آب منقبض می‌شوند [1, 2]. تورم، نیروهای بالابرنده در خاک ایجاد می‌کند، در نتیجه سازه‌های مهندسی ساخته شده در این خاک‌ها به شدت آسیب می‌بینند. راه‌ها، دیوارهای حائل، پی ساختمان‌ها، سدها و به طور کلی بیشتر سازه‌هایی که در آن‌ها خاک رس در تماس با آب است، در برابر خطر خرابی ناشی از تورم قرار دارند. به طوری که هزینه سالانه این خسارت‌ها در انگلیس حدود ۱۵۰ میلیون پوند، در آمریکا ۱۰۰۰ میلیون دلار و در سراسر جهان هزاران میلیون پوند برآورد می‌شود. برای بهبود و اصلاح مشکل‌های‌خاک‌های متورم‌شونده و رمبنده روش‌های بسیاری همچون عوض کردن خاک، پایدارکننده‌های شیمیایی، ساختن شالوده‌های شمعی، مهار رطوبت تراکم و ... مطرح شده‌اند. برای متعادل کردن رفتار تورمی و انقباضی خاک‌ها، روش هایی مانند تثبیت شیمیایی با آهک توسط Chen [1] و خاکستر بادی توسط Cokca [3]و Phanikumar and Sharma (2004) [4]، ارائه شدند. همچنین استفاده از ژئوسنتتیک توسط Ayyar et al. (1989) [5] و Vessely and Wu (2002) [6] و اخیراً استفاده از الیاف توسط Puppala, A. and ،Punthutaecha et al. (2006) Musenda (2000)، Cai (2006) و Ikizler et al. (2008) مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [7, 8, 9, 10].

با گسترش صنعت خودروسازی و از رده خارج کردن خودروهای فرسوده، سالانه حجم زیادی از لاستیک‌های فرسوده در سراسر جهان تولید و انباشت می‌شوند که این امر سبب شده است لاستیک‌های فرسوده به عنوان یکی از آلاینده‌های زیست محیطی در دهه‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران قرار بگیرد. انجمن تولید-کنندگان لاستیک در سال ۲۰۰۶ برآورد می کند که در ایالات متحده آمریکا سالانه بیش از ٤٤١٠ هزار تن (معادل ۲۹۹ میلیون حلقه) لاستیک فرسوده تولید می‌شود که از این مقدار، فقط ۱۸٪ در سطح زمین دپو و انباشت می‌شود و باقی ماتده لاستیک‌ها بازیافت و در موردهای مختلف دوباره مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین این آمار نشان می‌دهد که از میزان لاستیک‌های فرسوده بازیافت شده، حدود ١٦٪ در مهندسی عمران به مصرف می‌رسد [11]. صمدیان در سال ۱۳۸۵ گزارش داد در ایران نیز سالانه بیش از ۲۵۰ هزار تن لاستیک فرسوده تولید می‌شود که نباید گزارش‌های آماری حدود ۳۵٪ آن در موردهای گوناگونی مانند روکش‌کردن لاستیک فرسوده، مخلوط آسفالت، بازیافت و ریکلیم رابر (کائوچوی احیا شده) مصرف و باقی‌ماتده‌ها دپو و انباشت می‌شوند [12]. برای جلوگیری از مشکل‌های زیست محیطی و بهداشتی ناشی از انباشت لاستیک‌های فرسوده، روش‌های ابتکاری بسیاری برای بازیافت و استفاده‌دوباره از این مواد در مهندسی عمران گسترش یافته‌اند. Humphrey مطرح کرد که کاربرد خرده لاستیک‌های بازیافت شده دارای برتری‌هایی مانند چگالی کم، دوام بالا، عایق حرارتی بالا بوده و در بسیاری موارد هزینه کمتری نسبت به سایر مصالح خاکریز دارند [13]. در مهندسی عمران، کاربرد لاستیک‌های فرسوده برای مسلح سازی خاک‌های نرم در جاده‌سازی توسط Bosscher et al. (1991) [14]، پایدارسازی شیب‌ها توسط Poh and Broms (1995) [15]، مصالح سبک برای خاکریزی پشت دیوارهای حایل توسط Bosscher et al. (1991) و Lee et al. (1999) [14, 16]، مصالح زهکش شیرابه در مدفن‌های بهداشتی توسط Edil (2004) و Warith and Sudhakar (2006) [17, 18]، لاستیک‌های فرسوده را به جای مصالح زهکش شیرابه در مدفن‌های بهداشتی به کار بردند. Yilmaz and Degirmenci (2009) [19]، مواد افزودنی آسفالت توسط Foose et al. (1996) [20] و به عنوان مصالح دانه‌ای بتن توسط Eldin and Senouci (1993) و Ganjian (2009) [21, 22] مورد مطالعه قرار داده اند.

برای تعیین ویژگی های مهندسی خرده لاستیک و مخلوط‌های ماسه - خرده لاستیک پژوهش‌های مختلفی صورت گرفته است [16, 20, 23, 24, 25, 26, 27]. نتیجه ها نشان‌گر آن هستند که مخلوط‌های ماسه و خرده لاستیک را می‌توان به عنوان مصالح خاکریز سبک پشت دیوارهای حائل و خاکریز بزرگراهها بر روی خاک‌های سست با نشست‌پذیری بالا مورد استفاده قرار داد.

Cetin [28] ویژگی‌های ژئوتکنیکی مخلوط‌های رس- خرده لاستیک را با انجام آزمون‌های نفوذپذیری، برش مستقیم و تراکم بررسی کردند. آنان دریافتند که در درصدهای معین از خرده لاستیک‌های ریز و درشت مقاومت برشی مخلوط نسبت به رس خالص افزایش می-یابد و با بیشتر شدن خرده لاستیک در خاک، چسبندگی کاهش و زاویه اصطکاک داخلی افزایش می‌یابد. در نهایت پیشنهاد کردند که می‌توان از مخلوط‌های رس- خرده لاستیک به عنوان مصالح خاکریز در خاکریزی بزرگراهها، مصالح پرکننده پشت پایه پل‌ها و خاکریزی پشت دیوارهای حائل در بالای سطح ایستابی بهره گرفت.

Akbulut [29] اثر الیاف‌های لاستیک و مصنوعی را بر مقاومت فشاری تک‌محوری، پارامترهای مقاومتی و رفتار دینامیکی خاک‌های رسی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با انجام آزمایش‌های فشاری ساده، برش مستقیم و ستون تشدید گزارش دادند که در نمونه‌های مسلح شده، با افزایش الیاف لاستیک تا ۲٪، مقاومت فشاری تک‌محوری افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. برای نمونه‌های مخلوط با الیاف پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن نیز نتیجه‌ها بیانگر آن است که در مقدار الیاف ۰/۲٪، مقاومت فشاری تک محوری افزایش پیدا می‌کند. همچنین آنان دریافتند که با افزودن الیاف لاستیک و مصنوعی به خاک‌های رسی مقدارهای چسبندگی، نسبت میرایی و مدول برشی افزایش می‌یابد. با افزایش درصد الیاف در مخلوط نسبت میرایی بیشتر شده و در مقدار خاصی از الیاف (لاستیک و مصنوعی) به بیشترین مقدار خود می‌رسد و سپس با افزایش بعدی در مقدار الیاف، کم می-شود.

Cai [9] به این نتیجه رسیدند که افزودن الیاف پلی‌پروپیلن سبب افزایش توانایی انقباضی و کاهش توانایی تورمی خاک‌های رسی می‌شود. مسلح‌سازی خاک‌های متورم شونده با الیاف پلی‌پروپیلن مقاومت فشاری تک‌محوری را نیز می‌افزاید [7, 8].

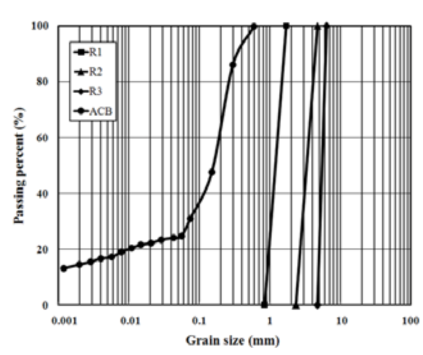
Viswanadham [30] با انجام آزمایش‌های تحکیم بر روی نمونه‌های مسلح شده با الیاف پلی‌پروپیلن مشاهده کردند که در اثر افزودن الیاف به خاک‌های رسی مقدار تورم و فشار تورمی کاهش می‌یابد. Ikizler et al. (2008) [10] امکان استفاده از ژئوفوم ساخته شده از پلی استیرن را بین دیوار حائل و خاک متورم‌شونده ارزیابی کردند و دریافتند که با کاربرد ژئوفوم، فشار تورمی جانبی ناشی از تورم خاک چسبنده کاهش پیدا می‌کند. Abdi et al. (2008) [31] با انجام آزمایش‌های تحکیم، رفتار نشست‌پذیری و تورمی خاک رس مسلح شده با الیاف پلی‌پروپیلن را مورد ارزیابی قرار دادند و دریافتند که با افزایش درصد الیاف در مخلوط میزان نشست تحکیمی در نمونه‌ها کمتر می‌شود. همچنین، تورم در نمونه‌های مسلح شده با الیاف در مقایسه با نمونه رس خالص کاهش قابل ملاحظه‌ای دارد.

مرور جامع مطالعه‌های پیشین نشان می‌دهد که بیشتر پژوهش‌ها بر روی رفتار مقاومتی و تغییرحجمی خاک‌های رسی مخلوط با الیاف مصنوعی، مصالح دانه‌ای و تا حدی خرده لاستیک بوده و ویژگی‌های تحکیمی، رفتار تورمی و نشست‌پذیری مخلوط‌های رس- خرد لاستیک معلوم نمی‌باشد. در این پژوهش، اثر درصد و اندازه خرده لاستیک بر روی ویژگی‌های مخلوط‌های رس– خرده لاستیک مطالعه می‌شود. برای رسیدن به این هدف، آزمایش‌های تراکم و تحکیم یک بعدی بر روی نمونه رس خالص و نمونه‌های مخلوط رس - خرده لاستیک، با اندازه و درصدهای مختلف خرده لاستیک انجام می‌شود. در پایان، بر مبنای نتیجه‌های به‌دست آمده، ویژگی های تحکیمی و رفتار تورمی آن‌ها بر حسب پارامترهای مختلف مورد ارزیابی قرارمی‌گیرند.

برنامه آزمایش‌ها

مصالح مورد استفاده. بخش اصلی مصالح چسبنده استفاده شده در نمونه‌ها از رس آذرشهر در محوطه دانشگاه تربیت معلم آذربایجان تهیه شد. برای دستیابی به خاک رس با خمیری بالا، یک گونه رس مصنوعی از مخلوط کردن ۸۰٪ رس آذرشهر (Azarshahr Clay) و ۲۰٪ رس بنتونیت (Bentonite) تجاری تهیه شد. در این پژوهش، مخلوط خاک رس آذرشهر و بنتونیت به طور خلاصه با "ACB" معرفی شد. حد روانی و شاخص خمیری این رس به ترتیب برابر با ٦١٪ و ٣٣٪ و توده ویژه آن ٢/٦٣٩ تعیین شد و بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد (USCS) بنابر استاندارد ASTM D2487 در گروه CH قرار می‌گیرد [32].

برای مسلح سازی نمونه‌های خاک رس از خرده لاستیک تهیه شده از لاستیک‌های فرسوده به کار رفته است. خرده لاستیک‌های مورد استفاده در این پژوهش از کارخانه اصفهان لاستیک تهیه شده‌اند که به روش آسیاب کردن لاستیک‌های کهنه و ضایعاتی وسایل نقلیه به صورت پودر لاستیک تولید می‌شوند. جنس همه خرده لاستیک‌ها یکی بوده و شکل آن‌ها به طور تصادفی و نامنظم است. ذرات لاستیک از الک‌های مورد نظر رد شده و بر اساس اندازه به سه نوع تقسیم شدند. خرده لاستیک R1 مصالح مانده بین الک نمره ١٢ و ٢٠ نمره، خرده لاستیک R2 مصالح مانده بین الک نمره ٤ و نمره ٨ و خرده لاستیک R3 مصالح مانده بین الک نمره ٤ و الک "١/٤ می‌باشند. توزیع اندازه ذرات خاک رس و خرده لاستیک‌ها در شکل (١) ارائه شده است.



شکل ١ توزیع اندازه ذرات خاک رس و خرده لاستیک‌ها

روش ساخت نمونه‌ها. برای تهیه نمونه‌های مختلف، خاک رس (ACB) خشک با مقدارهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد خرده لاستیک‌های نوع R1، R2 و R3 مخلوط شد. فهرست نمونه‌های آزمایشگاهی به همراه برخی از ویژگی‌های آن‌ها در جدول (١) ارائه شده است. عدد نوشته شده در کنار نام نمونه‌ها، درصد وزنی رس در نمونه‌ها را نشان می‌دهد. به عنوان مثال، نمونه ساخته شده از ۷۰٪ خاک رس خالص و ۳۰٪ لاستیک R3 با نام R3-ACB70 نشان داده می‌شود. لازم به یادآوری است که درصد خرده لاستیک با ω_R نشان داده می‌شود.

جدول ١ فهرست و ویژگی‌های نمونه‌های آزمایش شده

ردیف	نام نمونه‌ها	خرده لاستیک، ω_R (٪)	ω_{opt} (%)	γ_{dmax} (kN/m^3)
١	ACB100	٠	٢١/٧٥	١٤/٧٨
٢	R1-ACB90	١٠	٢١/٥	١٣/٨
٣	R1-ACB80	٢٠	٢٠	١٢/٩٨
٤	R1-ACB70	٣٠	٢١	١٢/٢٨
٥	R2-ACB90	١٠	٢٠/١	١٤/٤
٦	R2-ACB80	٢٠	١٨/٩٨	١٣/٧٨
٧	R2-ACB70	٣٠	١٩/١٠	١٢/٧٢
٨	R3-ACB90	١٠	١٨/٥١	١٣/٦٣
٩	R3-ACB80	٢٠	١٩/٢٥	١٣/٤٢
١٠	R3-ACB70	٣٠	٢٠/٢٥	١٣/١

آزمایش‌های انجام شده

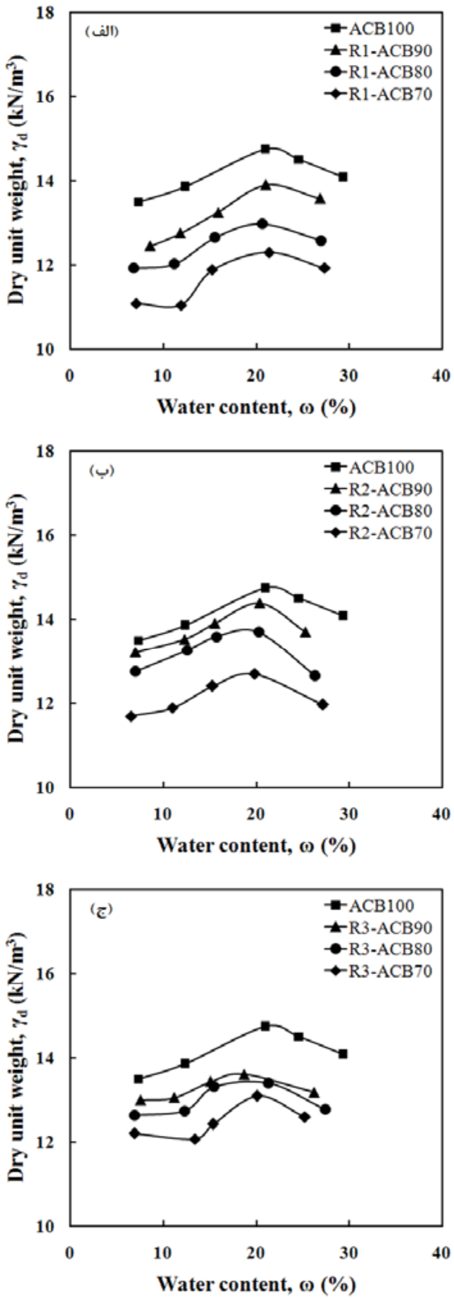
آزمایش‌های تراکم. هدف از انجام آزمایش‌های تراکم تعیین وزن مخصوص خشک بیشینه (γ_{dmax}) و درصد رطوبت بهینه (ω_{opt}) و مقایسه این ویژگی‌ها در نمونه‌های مسلح شده با نمونه رس خالص و نیز تهیه نمونه‌های تحکیم با شرایط صحرایی می‌باشد. برای این منظور، آزمایش‌های تراکم به روش پروکتور بنابر با استاندارد ASTM D698، بر روی مخلوط‌های مختلف رس–خرده لاستیک و رس خالص انجام شد [33]. لازم به ذکر است که برای به‌دست آوردن نمونه‌های همگن، مصالح لازم

برای هر لایه آزمایش (رس و خرده لاستیک) به صورت خشک با یکدیگر و سپس با آب مخلوط شده و قبل از تراکم در کیسه‌های پلاستیکی به مدت ۲۴ ساعت عمل‌آوری شدند. وزن مخصوص خشک بیشینه همه نمونه‌ها همراه با درصد رطوبت بهینه متناظر به طور خلاصه در جدول (۱) آمده است.

آزمایش‌های تحکیم یک‌بعدی. از این آزمایش برای تعیین پارامترهای مهم خاک مانند نشانه فشردگی (C_c)، نشانه تورم (C_s)، فشار تورمی (p_s) و ... استفاده می‌شود. مصالح مورد نیاز نمونه‌های آزمایش، با درصد رطوبت ۱٪ بیشتر از رطوبت بهینه با هم مخلوط شده و پس از عمل‌آوری، با دانسیته معادل با ۹۵٪ وزن مخصوص خشک بیشینه در دو لایه در داخل حلقه تحکیم (با قطر ۷۵ میلیمتر و ارتفاع ۲۰ میلیمتر) متراکم شدند. جهت درگیری و اتصال هر چه بیشتر لایه اول با لایه دوم، سطح لایه اول پس از تراکم خراش داده می‌شد. پس از سوار کردن نمونه روی دستگاه تحکیم، فشار ۵ kPa بر نمونه وارد و نمونه‌ها با آب مقطر اشباع شدند. پس از گذشت دست کم ۲۴ ساعت مقدار تورم آزاد نهایی نمونه‌ها قرائت شده و در ادامه با وارد کردن بارهای ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ کیلوپاسکال مرحله بارگذاری انجام پذیرفت. هر مرحله بارگذاری به مدت ۲۴ ساعت ادامه یافته و در فاصله‌های زمانی مختلف میزان نشست نمونه‌ها ثبت شد. پس از پایان مرحله‌های بارگذاری، باربرداری از نمونه در دو مرحله انجام و میزان تورم ناشی از باربرداری یادداشت شد. در نهایت، پارامترهای مختلف مانند نشانه تحکیم، نشانه تورم، تورم آزاد، فشار تورمی و میزان نشست‌پذیری بر حسب درصد خرده لاستیک و اندازه آن مورد ارزیابی قرار گرفتند.

نتیجه‌های آزمایش‌های انجام شده

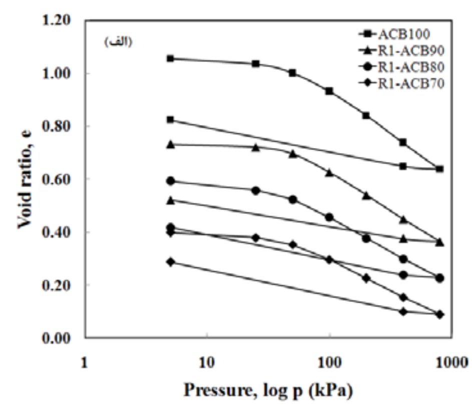
آزمایش‌های تراکم. در شکل (۲) منحنی‌های تراکم نمونه‌ها رسم شده است. به طور کلی مشاهده می‌شود که با افزودن خرده لاستیک به رس خالص وزن مخصوص خشک بیشینه کاهش می‌یابد. این روند برای نمونه‌های مخلوط با هر سه نوع خرده لاستیک صادق می‌باشد. علت کاهش در وزن مخصوص خشک به دلیل وزن مخصوص کم ذرات لاستیک نسبت به ذرات رس است. بنابراین از این مصالح می‌توان به عنوان مصالح خاکریز سبک استفاده کرد.

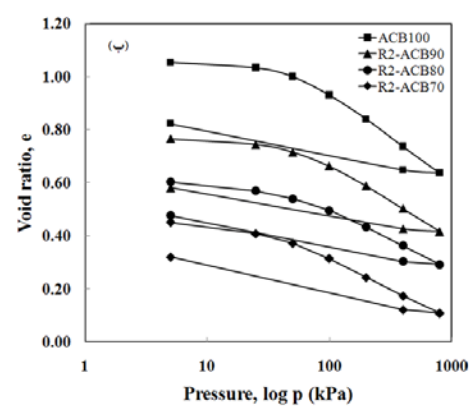


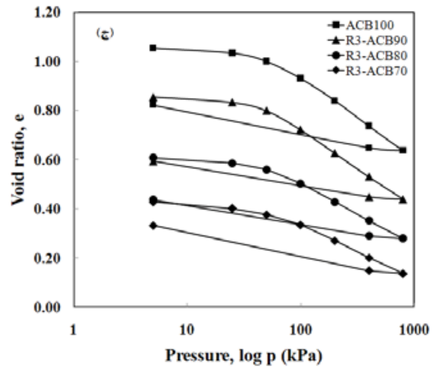
شکل ۲ نمودارهای تراکم خاک رس خالص ACB و نمونه‌های مخلوط رس با خرده لاستیک الف) R1، ب) R2 و ج) R3

درباره رطوبت بهینه نتیجه‌ها نشان می‌دهند که با افزایش درصد خرده لاستیک، بسته به اندازه خرده لاستیک، روند متفاوت است. در حالت کلی، اثر مقدار خرده لاستیک بر رطوبت چندان آشکار نمی‌باشد، ولی صرف‌نظر از اندازه و درصد آن، مقدار آن نسبت به رس خالص کمتر می‌شود.

نتیجه‌های آزمایش‌های تحکیم یک‌بعدی. در بیشتر موردها نتیجه‌های آزمایش تحکیم به صورت نمودارهای نسبت تخلخل در برابر فشار در مقیاس لگاریتمی (*e*-log *p*) ارائه می‌شود. این منحنی‌ها برای نمونه‌های مختلف در شکل (۳) ارائه شده است. از این شکل‌ها دیده می‌شود که با افزایش مقدار خرده لاستیک در مخلوط، منحنی‌های *e*-log *p* به سمت پایین گرایش پیدا می‌کنند. در ادامه، اثر درصد خرده لاستیک (ω_R) و اندازه آن‌ها بر روی شاخص‌های تحکیم و تورم مورد بررسی قرار می‌گیرد.



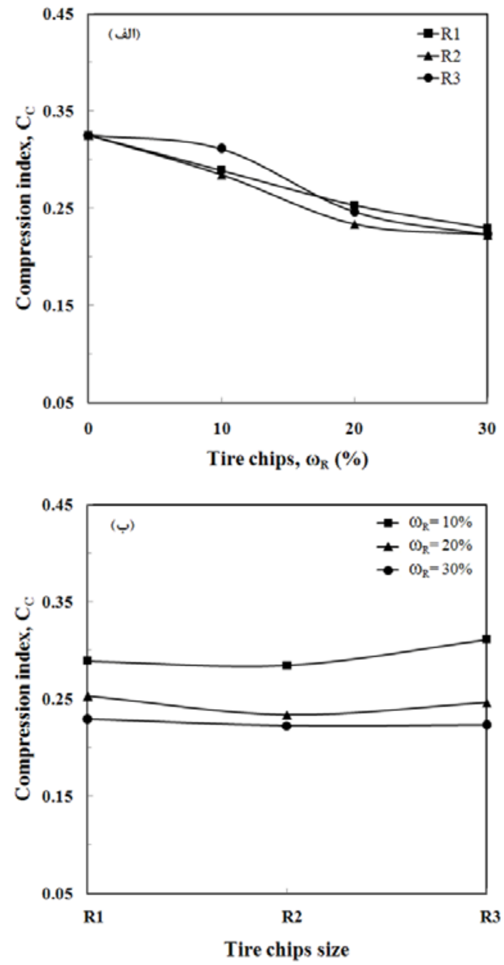




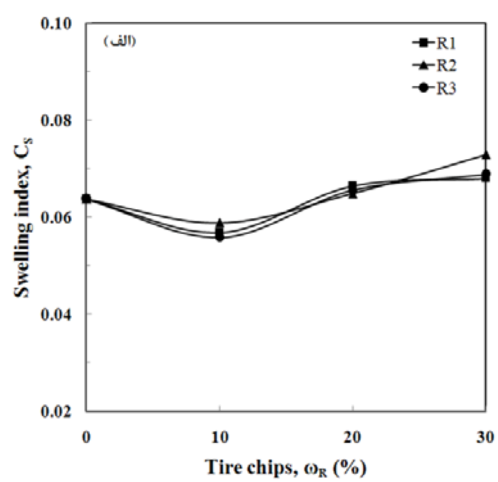
شکل ۳ تغییرات نسبت تخلخل با لگاریتم فشار برای نمونه‌های مخلوط حاوی خرده لاستیک: الف) R1، ب) R2 و ج) R3

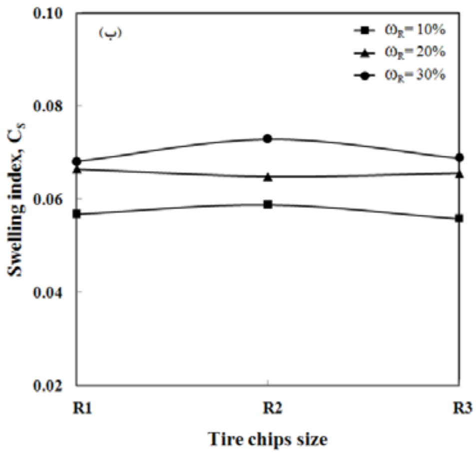
شاخص تحکیم. در شکل (٤- الف) تغییرات شاخص تحکیم نمونه‌ها (C_c) (Compression index) بر حسب درصد خرده لاستیک ارائه شده است. ملاحظه می‌شود با افزایش درصد خرده لاستیک در مخلوط مقدار شاخص تحکیم کاهش می‌یابد. بیشترین میزان کاهش مربوط به نمونه‌های مخلوط با ۳۰٪ خرده لاستیک است. برخلاف افزایش خرده لاستیک، علت این کاهش را می‌توان به کم بودن نسبت تخلخل اولیه نمونه‌های دارای خرده لاستیک بالا نسبت داد. همچنین، تغییرهای شاخص تحکیم بر حسب اندازه خرده لاستیک در شکل (٤- ب) ارائه شده است. از این شکل‌ها مشاهده می‌شود که در مخلوط‌های با خرده لاستیک R3، شاخص تحکیم نسبت به نمونه‌های مخلوط با خرده لاستیک‌های R1 و R2 اندکی بیشتر است.

شاخص تورم. در شکل (٥- الف) نمودار تغییرهای شاخص تورم (C_s) (Swelling index) بر حسب درصد لاستیک برای نمونه‌های مخلوط با خاک رس ACB رسم شده است. شاخص تورم نمونه‌های مخلوط با ۱۰٪ خرده لاستیک نسبت به رس خالص کمتر می‌باشد. لیکن با افزایش مقدار خرده لاستیک از ۱۰٪ به ۳۰٪ شاخص تورم بیشتر می‌شود. از روی نمودار تغییرهای شاخص تورم در مقابل اندازه خرده لاستیک (شکل ٥- ب) مشاهده می‌شود که در حالت کلی اندازه خرده لاستیک اثر چندانی بر شاخص تورم ندارد.



شکل ٤ تغییرات شاخص تحکیم با: الف) درصد خرده لاستیک، ب) اندازه خرده لاستیک





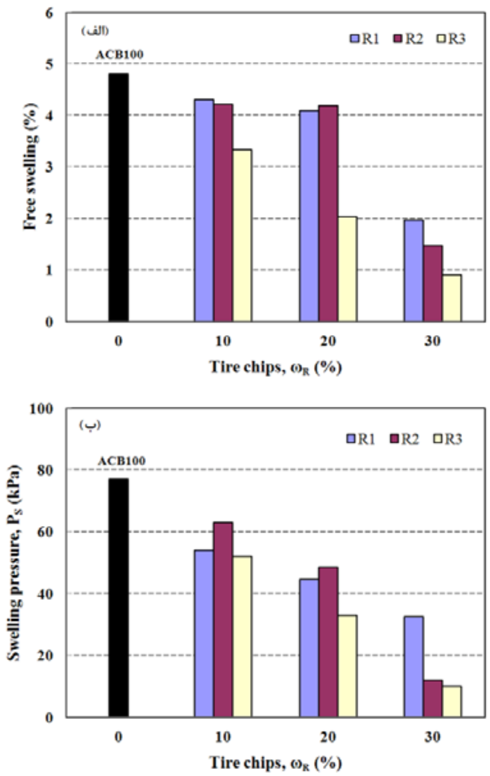
شکل ٥ تغییرات شاخص تورم با: الف) درصد خرده لاستیک، ب) اندازه خرده لاستیک

تورم آزاد. تورم آزاد همان تورم نمونه در اثر جذب آب در اثر سربار ناچیز (که در این پژوهش 5 kPa انتخاب شد) می‌باشد. در آزمایش تحکیم یک بعدی، تورم آزاد درصد تغییر ارتفاع نمونه در اثر جذب آب به ارتفاع اولیه آن است و از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$\text{Free Swelling}(\%) = \frac{\Delta H}{H_0} \times 100 \qquad (1)$$

که در این رابطه H_0 و ΔH به ترتیب ارتفاع اولیه نمونه و تغییر ارتفاع نمونه در اثر جذب آب می‌باشند.

تغییرات تورم آزاد نمونه‌ها با درصد خرده لاستیک در شکل (٦-الف) ارائه شده است. مشاهده می‌شود با افزودن خرده لاستیک تورم آزاد کاهش می‌یابد و کمترین آن در نمونه‌های با ۳۰٪ لاستیک است. مقدار تورم برای نمونه R3-ACB70، حدود ۰/۹٪ می‌باشد در حالی که این مقدار برای رس خالص ٤/٨٪ است. به عبارت دیگر، مقدار تورم نمونه مسلح شده نسبت به رس خالص حدود ۸۰٪ کاهش دارد. همچنین شکل (٦-الف) بیانگر این است که مقدارهای تورم آزاد در نمونه‌های با خرده لاستیک R3 بیشترین کاهش را نسبت به رس خالص دارند. همچنین ملاحظه می‌شود اثر اندازه خرده لاستیک در مقایسه R2 با R1 به تقریب اندک ولی در مقایسه R2 با R3 قابل ملاحظه است.



شکل ٦ تغییرات الف) تورم آزاد، ب) فشار تورمی، با درصد خرده لاستیک

فشار تورمی. با استفاده از منحنی‌های e-log p فشار تورمی نمونه‌های مختلف تعیین شد. در شکل (٦ ب) تغییرات فشار تورمی با درصد خرده لاستیک برای نمونه‌های مسلح شده رسم شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش درصد خرده لاستیک میزان فشار تورمی کاهش یافته و صرف‌نظر از اندازه لاستیک، در نمونه‌های با ۳۰٪ خرده لاستیک بیشترین کاهش در فشار تورمی مشاهده می‌شود. برای مثال، فشار تورمی نمونه رس خالص ۷۷ kPa است، در حالی که برای نمونه‌های دارای ۳۰٪ خرده لاستیک گونه R2 و R3 مقدار فشار حدود ۱۰kPa می‌باشد؛ به عبارت دیگر، فشار تورمی حدود ۸۵٪ کم شده است.

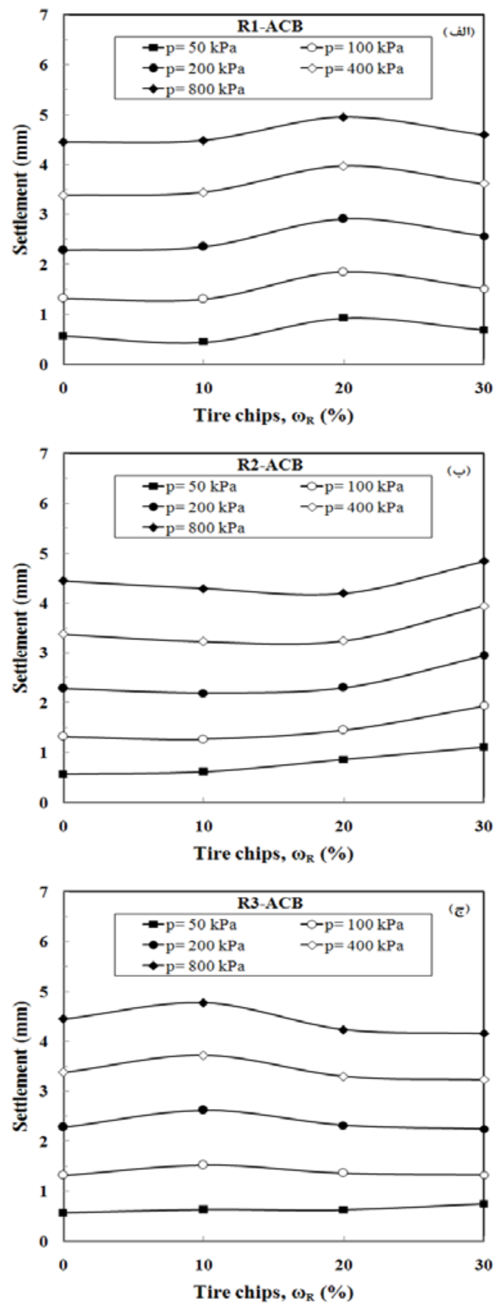
همچنین، از این شکل دیده می‌شود که روند تأثیر اندازه خرده لاستیک بر روی فشار تورمی، بسته به درصد خرده لاستیک متفاوت است. در مخلوط‌های با مقدارهای ω_R برابر با ۱۰ و ۲۰ درصد نمونه‌های با خرده لاستیک گونه R2 بیشترین فشار تورمی را دارند. ولی در مخلوط‌های با ω_R = ۳۰٪، با افزایش اندازه خرده لاستیک مقدار فشار تورمی کمتر می‌شود.

سازوکاری که باعث می‌شود خرده لاستیک از تورم خاک‌های رسی جلوگیری کند را می‌توان با اندرکنش خاک- خرده لاستیک بیان کرد. هنگامی‌که در اثر جذب آب، تورم در خاک رس رخ می‌دهد، خرده لاستیک‌های خمیده موجود در خاک کشیده می‌شوند. خمیدگی و کشش پدید آمده در خرده لاستیک‌ها در برابر تورم مقاومت می‌کند. مقاومت خرده لاستیک در برابر نیروی تورم بر اساس سطح تماس خاک- خرده لاستیک بیان می‌شود، به طوری‌که با افزایش اندازه خرده لاستیک در مخلوط، سطح تماس خرده لاستیک با ذرات رس بیشتر شده و این امر سبب کاهش قابل ملاحظه‌ای در توانایی تورمی می‌شود. به عبارت دیگر، هر چه سطح تماس خرده لاستیک با ذرات رس بیشتر باشد کاهش توانایی تورمی در خاک چشم‌گیرتر است.

نشست‌پذیری. برای بررسی رفتار نشست‌پذیری نمونه‌های مختلف، تغییرات نشست نمونه‌ها با درصد خرده لاستیک برای فشارهای مختلف در شکل (۷) رسم شده‌اند. در این شکل‌ها میزان نشست نهایی در پایان هر مرحله از بارگذاری، زیر فشار سربار ثابت، بر حسب درصد خرده لاستیک ارائه شده است. با توجه به شکل (۷- الف) ملاحظه می‌شود که نمونه‌های دارای ۲۰٪ خرده لاستیک R1 بیشترین نشست را دارند. در نمونه‌های با ۱۰٪ خرده لاستیک تغییرات چندانی در نشست نسبت به رس خالص دیده نمی‌شود. همچنین، میزان نشست نمونه‌های با ۳۰٪ لاستیک نسبت به رس خالص اندکی بیشتر است. از شکل (۷- ب) دیده می‌شود که با افزودن ۱۰٪ و ۲۰٪ خرده لاستیک گونه R2 به رس ACB تغییر چندانی در نشست نمونه‌ها رخ نمی‌دهد، ولی در نمونه‌های دارای ۳۰٪ خرده لاستیک، نشست تحکیمی نمونه‌ها نسبت به رس خالص بیشتر می‌شود.

همچنین از شکل (۷- ج) مشاهده می‌شود که بیشترین میزان نشست با افزودن ۱۰٪ خرده لاستیک گونه

R3 به رس ACB رخ می‌دهد. در حالی که در نمونه‌ها با ۲۰٪ و ۳۰٪ لاستیک تغییر چندانی در نشست ملاحظه نمی‌شود. با بررسی این شکل‌ها می‌توان منیجه گرفت که روند نشست‌پذیری علاوه بر درصد خرده لاستیک در مخلوط به اندازه آنها نیز بستگی دارد.



شکل ۷ تغییرات نشست تحکیمی با درصد خرده لاستیک

نتیجه گیری

این پژوهش با توجه به ضرورت و اهمیت موضوع از دیدگاه مدیریت مواد زائد، بازیافت و استفاده دوباره از لاستیک‌های فرسوده و استفاده از آنها در بهبود برخی ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌های رسی انجام شد. مطالعه‌های آزمایشگاهی بر روی رفتار مخلوط‌های رس- خرده لاستیک با انجام آزمون‌های تراکم و تحکیم یک- بعدی برای بررسی اثر پارامترهای مختلفی مانند درصد خرده لاستیک و اندازه خرده لاستیک بر روی رفتار تحکیمی، تورمی و نشست‌پذیری مخلوط‌های رس- خرده لاستیک انجام گرفت. مهم‌ترین نتیجه‌های به‌دست آمده به شرح زیر است:

۱- با افزودن خرده لاستیک به رس، وزن مخصوص خشک بیشینه نمونه‌ها کاهش می‌یابد. علت آن وزن مخصوص کم و قابلیت کم جذب آب دانه‌های لاستیک نسبت به ذرات رس می‌باشد.

۲- شاخص تحکیم (C_c) در نمونه‌های دارای خرده لاستیک با افزایش درصد خرده لاستیک کاهش و در مقابل شاخص تورم (C_s) افزایش می‌یابد.

۳- با افزودن خرده لاستیک توانایی تورمی در خاک‌های رسی متورم شونده کاهش می‌یابد. به طوری که تورم آزاد در نمونه‌های مسلح شده با افزایش درصد خرده لاستیک کاهش می‌یابد. همچنین، اندازه خرده لاستیک بر مقدارهای تورم آزاد نمونه‌های مسلح شده اثرمی‌گذارد می‌باشد و خرده لاستیک گونه R3 نسبت به گونه‌های دیگر بیشترین اثر کاهشی را بر تورم آزاد دارد.

٤- فشار تورمی (p_s) نمونه‌های دارای خرده لاستیک کاهش چشم‌گیری داشت. مقدار فشار تورمی برای نمونه رس خالص در حدود ۷۷ کیلوپاسکال است که با افزودن ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد خرده لاستیک گونه R3 این مقدار به ترتیب به ۵۲، ۳۳ و ۱۰ کیلوپاسکال کاهش یافت. افزون بر این، فشار تورمی در نمونه‌های مسلح شده با خرده لاستیک گونه R3 بیشترین کاهش را دارد.

۵- رفتار نشست‌پذیری نمونه‌ها به اندازه خرده لاستیک و

درصد آن بستگی دارد.

تشکر و قدردانی

این پژوهش در آزمایشگاه مکانیک خـاک دانشـگاه بنـاب انجام شد. بدین ترتیب نویسندگان بر خود لازم می‌داننـد از جناب آقای مهندس معرفت و مهنـدس رفعتـی کمـال تشکر و قدردانی را نمایند.

مراجع

1. Chen, F.H., "*Foundations on Expansive Soils*", Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, (1988).
2. Nelson, D.J., and Miller, J.D., "*Expansive Soils: Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering*", John Wiley and Sons, New York, (1992).
3. Cokca, E., "Use of class C fly ashes for the stabilization of an expansive soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *ASCE*, 127(7), pp. 568-573, (2001).
4. Phanikumar, B.R., and Sharma, R.S., "Effect of fly ash on engineering properties of expansive soils", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *ASCE*, 130(7), 764-767, (2004).
5. Ayyar, T.S.R., Krishnaswamy, N.R., and Viswanadham, B.V.S., "Geosynthetics for foundations on a swelling clay", *In: Proceedings of International Workshop on Geotextiles*, Bangalore, India, pp. 176-180, (1989).
6. Vessely, M.J., and Wu, J.T.H., "Feasibility of geosynthetic inclusions for reducing swelling of expansive soils", Transportation Research Record, Report No. 1787, pp. 42-51, (2002).
7. Punthutaecha, K., Puppala, A.J., Vanapalli, S.K., and Inyang, H., "Volume change behaviours of expansive soils stabilized with recycled ashes and fibers", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *ASCE*, 18(2), pp. 295-306, (2006).
8. Puppala, A., and Musenda, C., "Effects of fiber reinforcement on strength and volume change in expansive soils", Transportation Research Record, Report No. 1736, pp. 134-140, (2000).
9. Cai, Y., Shi, B., Ng, C.W.W., and Tang, C., "Effect of polypropylene fibre and lime admixture on engineering properties of clayey soil", *Engineering Geology*, 87(3-4), pp. 230-240, (2006).
10. Ikizler, S.B., Aytekin, M., and Nas, E., "Laboratory study of expanded polystyrene (EPS) geofoam used with expansive soils", *Geotextiles and Geomembranes*, 26(2), pp. 189-195, (2008).
11. Rubber Manufacturers Association, "Scrap tire markets in the united states; 2005 Edition", Mar-023, Washington, D.C., (2006).

۱۲. صمدیان، فرح،" گزارش بازیافت لاستیک"، دفتر صنایع غیر فلزی وزارت صنایع و معدن، مرداد، (۱۳۸۵).

13. Humphrey, D.N., "Civil engineering applications of tire shreds", *Proceedings of the Tire Industry Conference*, Clemson University, 3-5 March, (1999).
14. Bosscher, P.J., Edil, T.B., and Kuraoka, S., "Design of highway embankments using tire chips", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *ASCE*, 123(4), pp. 295-304, (1997).

15. Poh, P.S.H., and Broms, B.B., "Slope stabilization using oldrubber tires and geotextiles", *Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE*, 9(1), pp. 76–80, (1995).
16. Lee, J.H., Salgado, R., Bernal, A., and Lovell, C.W., "Shredded tires and rubber–sand as lightweight backfill", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *ASCE*, 125, pp. 132-141, (1999).
17. Edil, T.B., Park, J.K., and Kim, Y.K., "Effectiveness of scrap tire chips as sportive drainage material", *Journal of Environmental Engineering*, *ASCE*, 130(7), pp. 824-831, (2004).
18. Warith, M.A., and Sudhakar, M.R., "Predicting the compressibility behaviour of tire shred samples for landfill applications", *Waste Management*, 26, pp. 268-276, (2006).
19. Yilmaz, A. and Degirmenci, N., "Possibility of using waste tire rubber and fly ash with Portland cement as construction materials", *Waste Management*, 29(5), pp. 1541-1546, (2009).
20. Foose, G., Benson, C. and Bosscher, P., "Sand reinforced with shredded waste tires", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *ASCE*, 122(9), pp. 760-767, (1996).
21. Eldin, N.N., and Senouci, A.B., "Rubber-tire particles as concrete aggregate", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 5(4), pp. 478–496, (1993).
22. Ganjian, E., Khorami, M. and Maghsoudi, A.A., "Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete", *Construction and Building Materials*, 23(5), pp. 1828–1836, (2009).
23. Ahmed, I., "Laboratory study on properties of rubber-soils", Report FHWA/IN/JHRP-93/4, Indiana Department of Transportation, (1993).
24. Edil, T. and Bosscher, P., "Engineering properties of tire-chips and soil mixtures", *Geotechnical Testing Journal*, *ASTM*, 17(4), pp. 453-464, (1994).
25. Yang, S., Lohnes, R.A. and Kjartanson, B.H., "Mechanical properties of shredded tires", *Geotechnical Testing Journal*, *ASTM*, 25(1), pp. 44-52, (2002).
26. Youwai, S. and Bergado, D.T., "Numerical analysis of reinforced wall using rubber tire chips-sand mixtures as backfill material", *Computers and Geotechnics*, 31(2), pp. 103-114, (2004).
27. Wu, W.Y., Benda, C.C., and Cauley, R.F., "Triaxial determination of shear strength of tire chips", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *ASCE*, 123(5), 479-482, (1997).
28. Cetin, H., Fener, M. and Gunaydin, O., "Geotechnical properties of tire-cohesive clayey soil mixtures as a fill material", *Engineering Geology*, 88 (1–2), pp. 110-120, (2006).
29. Akbulut, S., Arasan, S. and Kalkan, E., "Modification of clayey soils using scrap tire rubber and synthetic fibers", *Applied Clay Science*, 38(1-2), pp. 23-32, (2007).
30. Viswanadham, B.V.S., Phanikumar, B.R. and Mukherjee, R.V., "Swelling behaviour of a geofiber-reinforced expansive soil", *Geotextiles and Geomembranes*, 27(1), pp. 73-76, (2009).

31. Abdi, M.R., Parsapajouh, A. and Arjomand, A., "Effects of Random Fiber Inclusion on Consolidation, Hydraulic Conductivity, Swelling, Shrinkage Limit and Desiccation Cracking of Clays", *International Journal of Civil Engineering*, 6(4), pp. 284-292, (2008).

32. ASTM Standard D 2487, "Standard practice for classification of soils for engineering purpose (Unified Soil Classification System)", American Society of Testing and Materials, West Conshohocken, PA, (2004a).

33. ASTM Standard D 698, "Standard test method for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort", American Society of Testing and Materials, West Conshohocken, PA, (2004b).